

УДК 536.3

**П.Н. Гоман<sup>1</sup>, В.Р. Соболев<sup>2</sup>, Д.В. Баровик<sup>3</sup>, В.Б. Таранчук<sup>3</sup> (Беларусь)**<sup>1</sup>Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь,<sup>2</sup>Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка,<sup>3</sup>Белорусский государственный университет, e-mail: g\_pn83@mail.ru)

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОГНЯ В УСЛОВИЯХ ЛЕСНОГО НИЗОВОГО ПОЖАРА**

*Приводятся результаты исследования процесса формирования и распространения очага типичного низового пожара в лесном массиве сосновой формации. Определены кинетика формирования пламени и его температура при горении напочвенного материала в составе опада хвои сосны, мелких сучков, сухой травы и листьев. Выявлено пространственное распределение температурного поля вблизи очага цилиндрической формы.*

*Ключевые слова: лесной пожар, модельный очаг пожара, противопожарный барьер, лесопожарный мониторинг, лесной горючий материал, температура пламени.*

**P.N. Goman, V.R. Sobol, D.V. Barovik, V.B. Taranchuk (Belarus)**

## **EXPERIMENTAL AND NUMERICAL SIMULATION OF COMBUSTION AS WELL AS THE SPREAD OF FIRE IN THE FOREST GROUND FIRE**

*The results of the study of formation and distribution of typical ground firebase in the pine forest are given. Kinetics of flame and temperature during combustion of the soil material in the litter of pine needles, small twigs, dry grass and leaves is determined. The spatial distribution of temperature field close to cylindrical firebase has been revealed.*

*Key words: wildfire, model firebase, fire barrier, forest fire monitoring, forest fuel, flame temperature.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 26 апреля 2011 г.

### **Постановка проблемы**

Актуальность проблемы нейтрализации воздействия огня на растительность леса, равно как и разработка методов устранения последствий лесных пожаров, базируются, прежде всего, на совершенствовании средств борьбы с распространением фронта огня по нижнему ярусу.

Для проведения профилактической работы необходимо располагать комплексом данных по формированию очага пламени и его расширению при существующих условиях состояния и мощности напочвенного горючего слоя, его подверженности к передаче огня за счет воздействия тепловой энергии в непосредственной близости пламени.

Существующие методы противодействия в значительной степени разрешают возникающие проблемы, однако, в засушливые годы, как показывает практика, ущерб, наносимый огнем лесу, оказывается достаточно значительным. При изменяющихся природно-климатических условиях в сторону потепления обстановка с лесными пожарами осложняется. В подтверждение,

в 2010 году многочисленные возгорания, зафиксированные в Португалии, Израиле, США и др. странах, нанесли значительный ущерб. В России серьезно пострадали лесные массивы и прилегающие населенные пункты в Нижегородской, Московской, Рязанской, Воронежской областях: погибли более 50 человек, уничтожено более 2,5 *тыс.* домов при общей площади, пройденной огнем, свыше 800 *тыс. га*. В недавнем прошлом последствия природных пожаров, охвативших Грецию (2007 г.), Австралию (2009 г.) в продолжительные засушливые сезоны, оказались катастрофическими.

Как известно, помимо температуры окружающей среды на возникновение и распространение очага горения в природных экосистемах оказывают воздействие скорость и направление ветра, влажность и тепловые свойства горючего материала, действенность системы противопожарной защиты лесной территории и т.д.

К примеру, в довольно жаркое лето 2007 года (средняя температура воздуха за сезон +18,4 °C, что выше климатической нормы на 1,6 °C, в отдельные дни температура воздуха поднималась до +30 °C) в Беларуси наблюдалось уменьшение количества лесных пожаров, по сравнению с 2006 годом. Причиной этому во многом является количество выпавших за лето осадков (238 мм, т.е. 98 % от нормы), когда напочвенный материал, подверженный выгоранию, не достигал критического состояния по влагосодержанию.

Рекордное количество лесных пожаров с 1995 года в Беларуси было зафиксировано в жаркое и сухое лето 2002 года (5274), что выше аналогичного показателя 2001 года (1111) в четыре с лишним раза, с соответственно возросшей площадью, охваченной огнём (с 360 до 10108 *га*). Упомянутые последствия от действия огня при засухах наблюдаются вполне устойчиво, несмотря на ежегодное проведение комплекса дополнительных профилактических мероприятий [1-4].

Для прогнозирования и мониторинга обстановки в природоохранной сфере в ряде стран действуют специализированные центры, например, Канадский центр лесных пожаров, Центр глобального мониторинга пожаров в Германии, Национальный пожарный центр в США, Координационный центр по тушению лесных пожаров в Греции и др., которые разрабатывают и внедряют средства, включая программные комплексы, позволяющие отслеживать динамику пожаров с учётом природно-климатических условий, характеристик местности и лесного фонда.

В Беларуси Республиканский центр управления и реагирования на чрезвычайные ситуации также проводит работу по своевременному выявлению, локализации и ликвидации лесных пожаров, в том числе и с привлечением компьютерных сред мониторинга. Для расчёта и прогнозирования характера развития верховых и низовых пожаров рекомендуют программный продукт в оболочке Wolfram Mathematica и Borland Delphi, который дает возможность выявлять перемещение фронта и отображать положение контура пламени с течением времени для существующих геоклиматических условий [5-10].

Тем не менее, как показывает практика, средства электронного контроля пожарного состояния леса играют только вспомогательную роль, в том смысле, что математическая модель для подобного процесса, какой бы она совершенной ни была, может лишь приближенно описывать реальную ситуацию.

Трудности улучшения системы профилактики и предотвращения лесных пожаров значительны из-за тесной взаимосвязи скорости распространения огня по нижнему ярусу леса с большим количеством параметров состояния окружающей среды и напочвенного материала. Состав лесной подстилки, количество и мощность сгораемого слоя, способность к передаче тепла, быстрому подсушиванию и воспламенению определяют скорость расширения площади низового пожара за счёт воздействия тепловой энергии радиационной и конвекционной природы на прилегающие участки.

Естественные и искусственные преграды – дороги, противопожарные барьеры и разрывы, ручьи, овраги и т.д. в этих условиях часто оказываются преодолимыми. Перемещение огня определяется скоростью действия факторов, доводящих напочвенный слой до состояния спонтанного воспламенения – величины радиационного потока за препятствием, скоростью подхода фронта теплового источника, длительностью горения.

Для решения физической задачи необходимо располагать реальными значениями экспозиционных и поглощаемых потоков энергии, воздействующих на среду вблизи теплового протяженного источника-фронта. Также требуется знать скорость приближения фронта пламени к барьеру при конкретных значениях толщины слоя и состава напочвенного материала, плотности насыпки, тепловых свойств по передаче и накоплению энергии с учётом температуры и влажности среды и горючего материала.

Ввиду сложности учёта перечисленных факторов математическая формализация процесса распространения огня в лесном массиве вряд ли возможна. Поэтому решать тепловую задачу для больших площадей на основе дифференциальных уравнений, когда параметры среды и условия горения являются нелокальными характеристиками и меняются от одного участка к другому, нецелесообразно. Учесть различные естественные условия в протяженном лесном массиве с его склонами, возвышенностями, дорогами, тропами, просеками попросту невозможно.

Известные математические модели эмпирического и полуэмпирического характера описывают распространение огня в лесу при варьировании входных параметров, являющихся факторами, влияющими на процесс горения в лесу и движение огня [10-14]. Поэтому, используя готовые программные продукты, можно ввести коэффициенты, которые позволят привести существующие значения к результатам эксперимента.

Далее, проведя численный расчёт, можно распространить результаты испытаний на местности на условия, близкие к экспериментальным, то есть, выявив аппроксимационные коэффициенты, экстраполировать данные натурных измерений на состояние среды, близкое по своим параметрам к экспериментально исследованному. В этом смысле целесообразно адаптировать существующие пакеты программ к натурным условиям с учётом специфики как верхо-

вых, так и низовых пожаров, наличия препятствий природного и искусственного происхождения, встречающихся на пути распространения пламени.

Авторами проведено экспериментально-аналитическое изучение закономерностей формирования и распространения очага низового пожара в лесу сосновой формации, включая выявление скорости нарастания фронта пламени, высоты огня для определенного запаса напочвенного слоя, распределения температуры по высоте фронта пламени.

Оценены значения экспозиционной плотности лучистого потока энергии по пространству вблизи фронта горения, установлены уровни достигаемой температуры в напочвенном слое в области непосредственной близости к огню. В дополнение к этому выявлен диапазон значений скорости перемещения фронта низового пожара на горизонтальном участке леса с напочвенным покровом, состоящим преимущественно из опада хвои, а также степень влияния на мобильность фронта влажности горючего материала.

Результаты эксперимента адаптированы для инсталляции в программный комплекс на основе Borland Delphi с возможностью численного моделирования распространения фронта пламени для состояния окружающей среды и условий горения, смежных с экспериментальными по составу и плотности горючего материала, мощности его слоя и влажности.

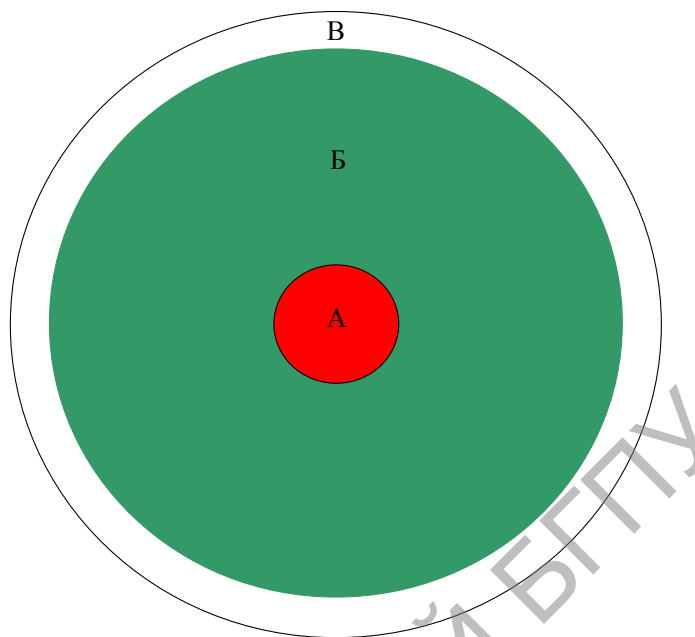
## **1. Экспериментальное исследование процессов возникновения и развития низового пожара.**

### **1.1. Условия и порядок проведения испытаний**

Эксперимент по изучению процессов, сопровождающих низовой пожар и его воздействие на близлежащий напочвенный горючий материал, проведен на полигоне Института леса НАН Беларуси (Кореневская экспериментальная лесная база). В сосновых насаждениях лишайникового типа была выполнена серия натурных испытаний, имитирующая возникновение очага низового пожара, формирование и развитие фронта пламени. Эксперимент осуществлен на горизонтальных участках соснового леса круглой формы с диаметрами от восьми до двенадцати метров. Подготовленный к выгоранию участок был разделен на две зоны – центральную А и периферийную Б. Центральная зона, как инициатор возникновения очага, была активизирована легковоспламеняющейся жидкостью (бензин в объеме 0,5 л) для создания начального очага пламени. Периферийная зона являлась экспериментальной моделью для исследования динамики низового пожара. По периметру периферийной зоны была создана минерализованная полоса шириной 1,4 м (рис. 1).

После воспламенения очага мгновенно охваченная пламенем зона А инициировала формирование и распространение цилиндрического фронта пламени в радиальном направлении. Замеры диаметра контура пожара и его высоты проводили с интервалом в 60 с. После достижения фронтом пламени минерализованной полосы и его стабилизации регистрировали высоту пламени и его температуру в нескольких точках, а также распределение температурного поля при удалении от центра по ширине минерализованной полосы и в прилегающих к ней областях. Температуру факела пламени контролировали посредством из-

мерителя-регулятора типа ИР "Сосна-003" в его портативном исполнении. Температуру напочвенного слоя в прилегающей к стабилизированному фронту пламени области измеряли ртутными термометрами, расположенными в одинаковых условиях на высоте, отвечающей нижней кромке пламени.



**Рис. 1.** Общая схема модельного очага пожара:

А – зона пуска огня ( $d = 1 \text{ м}$ );

Б – зона ЛГМ ( $d = 8\text{--}12 \text{ м}$ );

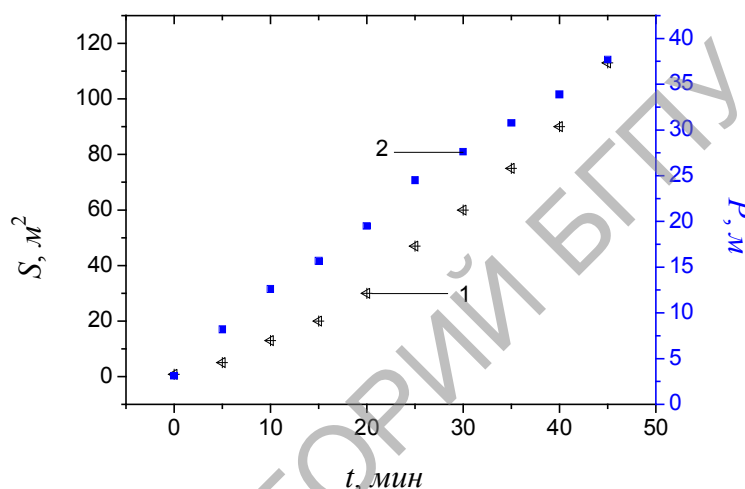
В – минерализованная полоса шириной  $1,4 \text{ м}$

Испытания по выявлению параметров возникновения и развития низового пожара осуществляли в комплексе с исследованиями по оценке эффективности действия огнезащитных и огнетушащих свойств химического состава "Метафосил", проводимыми сотрудниками Научно-практического центра пожарной безопасности Гомельского областного управления Министерства по чрезвычайным ситуациям. Регламентирующие документы предписывали обеспечить в ходе эксперимента соответствующие условия – скорость ветра не выше  $3 \text{ м/с}$ , температура окружающей среды в пределах  $20 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , влажность лесного горючего материала не более  $30 \%$ . Во время эксперимента комплексный погодный показатель горимости составил 4310, что отвечает IV классу пожарной опасности в лесу (высокая горимость) при скорости ветра в диапазоне  $0\text{--}1 \text{ м/с}$ , температуре воздуха  $21 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и влажности горючего материала около  $20 \%$ . Напочвенный слой, состоящий из опада хвои ( $80 \%$ ), мелких веточек, сучков, травы и листьев, приготавливался так, чтобы охватить по толщине достаточно широкий диапазон от пяти сантиметров при созданном запасе  $5 \text{ кг/м}^2$  и плотности  $100 \text{ кг/м}^3$  до одного сантиметра при естественном запасе  $2 \text{ кг/м}^2$  и плотности  $200 \text{ кг/м}^3$ . Испытания считались завершенными после полного выгорания всей массы горючего в пределах испытательной площадки в зонах А и Б.



## 1.2. Результаты натурных исследований

Периметр очага пожара, площадь горения, равно как и скорость передвижения фронта пламени определяют способность пожара к распространению в окружающей среде. Установлено, что в начальный период развития пожара при переходе пламени из зоны А в зону Б скорость распространения фронта огня возрастает постепенно, что характерно для периода разгорания. В дальнейшем развитие пожара в перемещении его фронта происходит почти с постоянной скоростью. Это отвечает увеличению периметра огня по закону, близкому к линейному с течением времени (рис. 2). Горизонтальность испытательных площадок и относительная слабость ветра привели к реализации контура пламени почти круглой формы. Высота пламени вдоль фронта изменялась с течением времени, что отображено на отдельном фрагменте (рис. 3).



**Рис. 2.** Зависимость площади (1) и периметра (2) пожара от времени горения модельных очагов при температуре окружающей среды  $21^{\circ}\text{C}$ , скорости ветра  $1\text{ м/с}$ , запасе ЛГМ  $1,4\text{ кг/м}^2$ , влажности ЛГМ  $20\%$

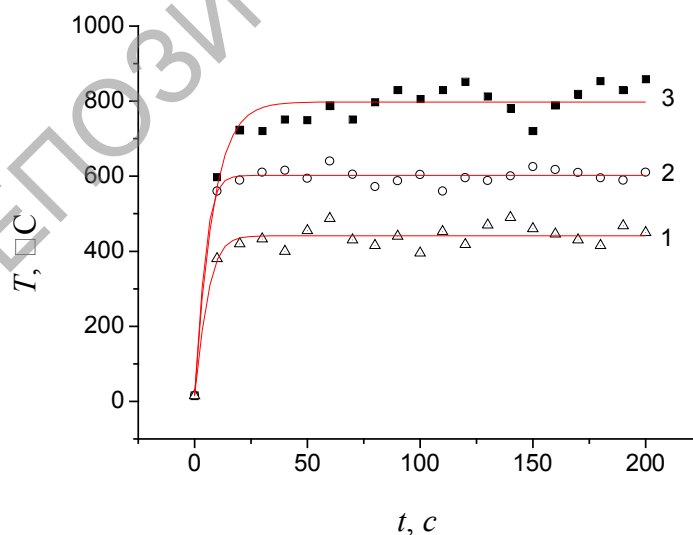


**Рис. 3.** Экспериментальное исследование возникновения и развития низового пожара

Скорость перемещения фронта пламени по напочвенному слою толщиной около 1 см не очень велика, для прохождения расстояния в 8 м огню потребовалось около 45 мин. Для более плотных и массивных напочвенных слоев скорость перемещения огня остается близкой, возрастая на 20-30 % при качественном подобии графической зависимости охватываемой площади во времени. В целом по всем экспериментальным площадкам время достижения пламенем границы минерализованной полосы составляло 30-50 мин в зависимости от размеров модельного очага.

Устойчивость опада хвои, мелких сучков, веточек, травы и листьев к воспламенению под действием радиационного потока и, соответственно, эффективность действия примененного стандартного противопожарного барьера были выявлены непосредственно в ходе испытания при существующих условиях горения. Разогрев напочвенного материала, в первую очередь, определяется мощностью теплового источника, которая зависит от высоты пламени и его температуры.

В литературе встречаются различные значения температуры горения для тех или иных видов горючего материала и их агрегатного состояния. Некоторая противоречивость оценок во многом определяется неодинаковыми условиями измерений, наличием тепловых потерь в виде излучения, потерь на химический и физический недожог, конвективных потерь тепла с уносимыми вверх потоками продуктов горения [15-17]. Наиболее надежным является непосредственное измерение температуры в различных точках плазмы. По результатам проведенных испытаний для низового пожара с проводниками горения в виде мелких древесных остатков – веточки, сучки, опавшая хвоя – температура пламени в его максимально разогретой части составляет около 800 °C (рис. 4).



**Рис. 4.** Зависимость температуры факела пламени от времени горения напочвенного покрова соснового леса:  
 1 – зона контакта с горючим материалом,  
 2 – центр факела, 3 – верхняя область факела.  
 Символы – эксперимент, кривые – линейная аппроксимация

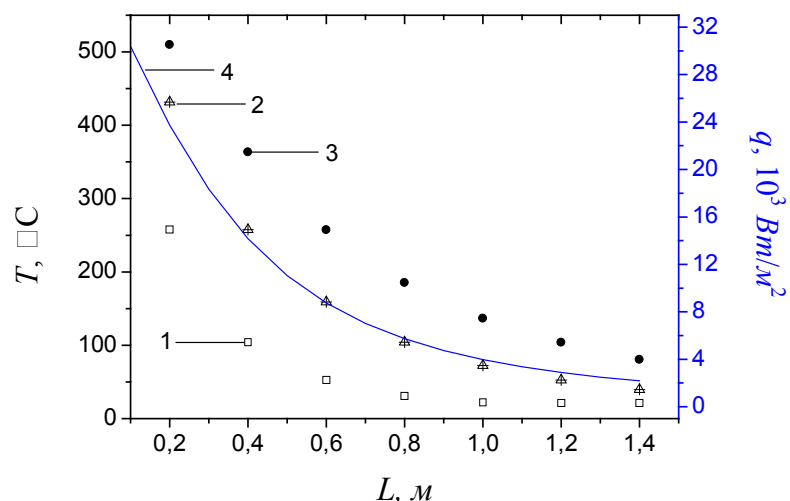
Указанные оценки подтверждаются данными лабораторных измерений. Отметим, что установленные значения температуры довольно велики и лишь незначительно уступают степени разогретости пламени при естественном горении легковоспламеняющихся и горючих жидкостей – 900 °С, сухой древесины – 1000 °С, сжиженных газов – 1200 °С [17]. Как следует из рис. 4, разгорание пламени и выход на предельное значение температуры происходит весьма быстро с последующими колебаниями с течением времени, связанными с движением фронта за счет перемещения конвекционных потоков продуктов сгорания и поступления более холодных воздушных масс в зону реакции через нижнюю область.

Как известно, распределение температурного поля вблизи теплового источника в значительной степени формируется как температурой излучателя, так и его формой, определяющими мощность излучающего фронта. При воздействии теплового потока на горючий материал, примыкающий к зоне горения, происходит его прогрев, высушивание с элементами пиролиза и выделением газообразных продуктов и воспламенение после достижения критического по температуре состояния.

Минерализованная полоса, как механический барьер для распространения огня по напочвенному покрову, также нейтрализует воздействие теплового потока, если ее ширина отвечает безопасной дистанции. Безопасная ширина полосы в общем случае должна зависеть от мощности теплового фронта пламени, которая, в свою очередь, определяется запасом, составом и состоянием напочвенной горючей подстилки. В условиях выполненного эксперимента толщина слоя материала достигала 5 см при максимальной плотности 200 кг/м<sup>3</sup>. Для выявления распределения температурного поля от фронта огня, стабилизированного минерализованной полосой, применены ртутные термометры с ценой деления 1 °С, которые были установлены вдоль радиального направления от центральной зоны с интервалом 0,2 м. Значения уровней температуры напочвенного слоя на различном удалении от фронта пламени отвечают гиперболическому закону изменения с увеличением расстояния от фронта пламени (рис. 5).

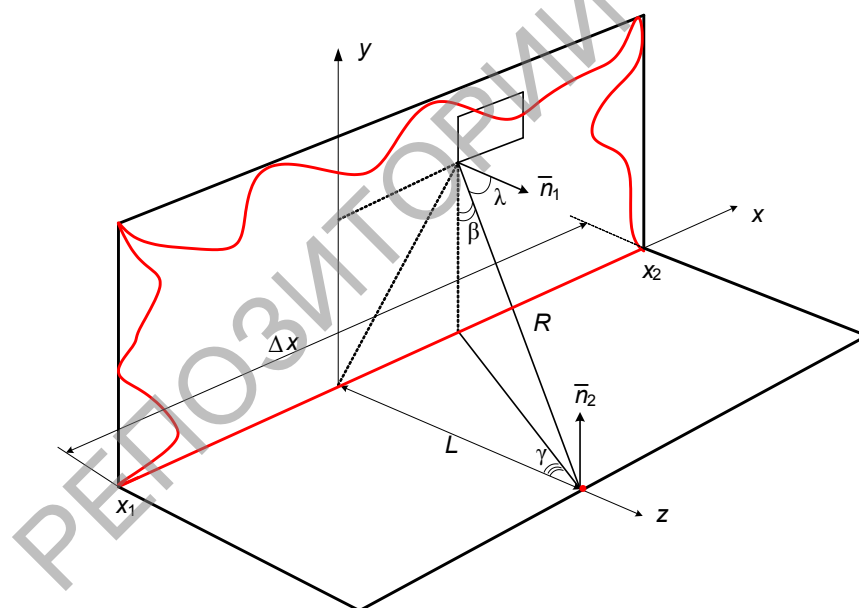
На рис. 5 среди точек для результатов измерения температуры находится кривая 4, которая отражает закономерности пространственной зависимости экспозиционной плотности теплового потока для излучающего фронта пламени плоской формы. Пространственная зависимость экспозиционной плотности теплового потока получена аналитически, методом суммирования элементарных вкладов от точечных источников, расположенных в плоскости фронта пламени (рис. 6) [18].





**Рис. 5.** Вид температурного поля в напочвенном горячем слое от цилиндрического фронта пламени стационарного низового пожара при различном удалении для значений высоты огня  $h$ , м: 0,25 (1), 0,5 (2), 0,75 (3).

Кривая (4) – результаты аналитического расчёта распределения плотности радиационного потока энергии от плоского фронта пламени шириной 10 м, высотой 0,5 м и температурой 800 °С



**Рис. 6.** Схема воздействия лучистого теплового потока от плоского источника в произвольной локальной точке перед фронтом излучателя

В приближении изотропности испускательной способности плоского излучающего фронта получено выражение для локальной составляющей потока лучистой энергии  $q$ , нормального к поверхности земли, которое отвечает воздействию радиационного потока энергии на напочвенный покров для точек наблюдения, симметричных по ширине пламени, что характерно условиям настоящего эксперимента

$$q = \frac{\sigma T^4}{\pi} \left[ \operatorname{arctg} \frac{x}{L} - \frac{L}{\sqrt{L^2 + h^2}} \left( \operatorname{arctg} \frac{x}{\sqrt{L^2 + h^2}} \right) \right], \quad (1)$$

где  $T$  – абсолютная температура излучающей поверхности,  $^{\circ}\text{K}$ ;

$\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;

$x$  – координата, задающая полуширину фронта излучающей поверхности,  $\text{м}$ ;

$L$  – расстояние от излучающей поверхности до точки наблюдения,  $\text{м}$ ;

$h$  – высота излучателя,  $\text{м}$ .

В связи с тем, что при проведении натурных испытаний фронт пламени имел цилиндрическую, а не плоскую форму, значения плотности лучистого теплового потока, представленные на рис. 5, будут слегка завышены, в сравнении с действительными, поскольку вклад краевых участков в результирующий поток тепловой энергии, поступающей в данную точку, меньше. Однако следует ожидать, что с увеличением диаметра цилиндрического очага, в сравнении с расстоянием до точки наблюдения, ослабляется вклад краевых участков. Как для участков фронта, расположенных напротив точки наблюдения, так и для участков в других местах вдоль основания фронта их воздействие в локальной точке наблюдения будет приближаться по эффекту к действию плоского излучателя, если расстояние мало, по сравнению с диаметром. С учётом сказанного, для оценки распределения плотности лучистого теплового потока вблизи фронта целесообразно излучатель рассматривать в форме плоскости, ширина которой не превышает диаметр цилиндрического фронта. Для получения более точных данных по теплообмену излучением в условиях натурных испытаний необходимо оценить геометрический коэффициент пропорциональности между цилиндрическим излучающим фронтом произвольных размеров и величиной плотности лучистого теплового потока в произвольной точке перед ним.

Как видно из рис. 5, с увеличением расстояния до фронта излучателя температура существенно снижается. Например, при высоте пламени  $h = 0,5 \text{ м}$  удаление от огня на  $1 \text{ м}$  приводит к уменьшению температуры до  $70^{\circ}\text{C}$ , что минимизирует вероятность дальнейшего распространения огня. Следует отметить, что высота фронта огня оказывает значительное влияние на зависимость температуры от расстояния до точки наблюдения. При увеличении высоты пламени с  $0,25 \text{ м}$  до  $0,75 \text{ м}$  температура в зоне напочвенного покрова на расстоянии  $0,6 \text{ м}$  от фронта увеличивается с  $50^{\circ}\text{C}$  до  $260^{\circ}\text{C}$ . Можно заключить, что условие безопасности будет выполнено, если температура за противопожарным барьером не достигнет критического значения по воспламенению.

Поскольку безопасное расстояние может быть определено исходя из минимального значения температуры, при которой возникает и поддерживается устойчивое пламенное горение, то исходя из данных по температуре воспламенения, рассматриваемых в данном случае горючих компонент [19], которая составляет  $250\text{--}350^{\circ}\text{C}$ , следует, что при слабой интенсивности развития пожара, для которого высота пламени  $h \leq 0,5 \text{ м}$ , безопасное расстояние должно составлять около  $0,4 \text{ м}$ , а при низовом пожаре средней интенсивности с высотой пламени  $h = 0,75 \text{ м}$  безопасное расстояние увеличивается до  $0,6 \text{ м}$ .

Отметим, что при среднем низовом пожаре высота пламени может достигать 1,5 м, а сильный низовой пожар характеризуется высотой пламени в 2, 3 и более метров. Это потребует значительных безопасных расстояний порядка нескольких метров, которые смогут обеспечить устойчивость среды, предотвратив чрезмерный разогрев.

В ходе проведенных натурных испытаний установлено, что для состояния слоя напочвенного материала при метеорологических и природных условиях, отвечающих четвертому классу горимости, ширина минерализованной полосы в 1,4 м несколько даже избыточна, поскольку обеспечивается двукратный запас защиты по расстоянию для достигнутого фронта пламени высотой 0,75 м. Однако, для низовых пожаров большей мощности размер безопасного расстояния следует рассматривать отдельно с учётом возможности сочетания методов испытания на местности и расчёта интенсивности лучистого потока энергии.

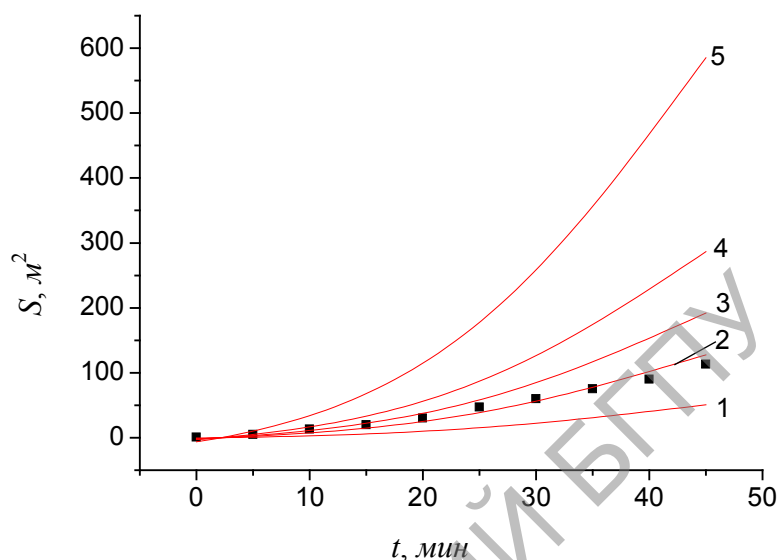
Для вычисления безопасного расстояния при повышенных мощностях теплового источника требуется экстраполировать результаты эксперимента на большие масштабы, для чего имеет смысл решить задачу аналитически и исходя из соотношения между локальными значениями теплового потока и температуры, полученными на опыте и в ходе расчёта, распространить расчёт по плотности теплового потока на повышенные значения температуры. Такой подход возможен благодаря тому, что экспериментальные значения температуры напочвенного материала и расчётные значения плотности теплового потока для условий, реализуемых в ходе эксперимента, близки. Это дает основания установить корреляцию между мощностью теплового источника, локальной плотностью потока лучистой энергии и достигаемыми уровнями температуры горючего напочвенного материала.

## **2. Числовая экстраполяция результатов эксперимента**

Ввиду высказанных предположений о трудностях решения физической задачи по горению леса, распространению огня и приближенности эмпирических подходов на основе статистических данных по пожарам в конкретной местности, авторами был применен полуэмпирический подход. Численное моделирование процесса развития пожара проведено с использованием программного продукта "Расчёт и визуализация динамики лесного пожара", разработанного в среде Borland Delphi [10].

На рис. 7 представлены результаты обобщения данных эксперимента в сериях натурных наблюдений по скорости распространения фронта пламени и увеличению охватываемой пожаром площади. Числовая аппроксимация процесса распространения фронта представляет семейство кривых, построенных на основании результатов измерений. Расчётная кривая через экспериментальные точки, как следует из рис. 7, может быть проведена как с большей кривизной в области промежуточных значений времени, что и представлено на рисунке, так и в квазилинейной аппроксимации. При проведении экспериментальных

исследований трудно смоделировать все возможные состояния по влажности среды, но численные подходы позволяют преодолеть эти трудности. Точность прогноза тем выше, чем ближе моделируемое состояние к экспериментально установленному. В этом смысле вызывает сомнения корректность прогноза для состояния по влажности 5 %, которое в природе едва ли достижимо, но близлежащие к эксперименту состояния (15 %, 25 % влажности) можно рассматривать как реальные оценки.



**Рис. 7.** Зависимость площади пожара от времени горения при температуре окружающей среды 21 °С, скорости ветра 1 м/с, запасе ЛГМ 1,4 кг/м<sup>2</sup> для уровней влажности ЛГМ, %: 25 (1), 20 (2), 15 (3), 10 (4), 5 (5). Символы – эксперимент при влажности ЛГМ 20 %, линии – числовая аппроксимация

Влажность напочвенного покрова, как известно, зависит от количества осадков, выпавших в период пожароопасного сезона. Данные в литературе по этому вопросу достаточно противоречивы, так как получены по измерениям, проведенным в неидентичных условиях с использованием разных методик [20, 21]. Например, указывается, что нижний порог влажности для лишайников 6-8 %, мха – 18-22 %, осадки небольшой величины (2-3 мм) увлажняют напочвенный покров до состояния негоримости, но пожароопасность покрова восстанавливается в первый сухой день. Осадки величиной более 7 мм увлажняют напочвенный покров с начального уровня в 15-20 % до 60 % и более. В целом можно согласиться с мнением авторов, что низовые пожары возникают и распространяются при влажности лесного горючего материала не более 30 % [20, 21]. Соответственно, представленное на рис. 7 семейство кривых отображает высказанное положение для верхнего диапазона по содержанию влаги. Нижний диапазон по влажности в оценках скорости распространения, вероятно, дает несколько завышенное значение. Поскольку в процессе горения одновременно с образованием продуктов реакции выделяется теплота, то влажное топливо часть выделившейся теплоты затрачивает на испарение воды, находящейся в материале. Выделяемое количество энергии при горении меньше и скорость распространения огня снижается до полной остановки и прекращения го-

рения. Действительно, как видно из рис. 7, при влажности напочвенного покрова 25 % с течением времени площадь пожара перестает существенно изменяться. Можно предположить, что дальнейшее увеличение влажности материала приведет к полному прекращению горения даже при длительном воздействии на него тепловой энергии.

### Заключение

1. Экспериментальное моделирование низового пожара на местности позволило выявить закономерности развития пламени, распределение температуры в самом факеле и в напочвенном материале в области, прилегающей к стабилизированному цилиндрическому фронту.

2. Горение слоя хвой и древесных мелких остатков общей толщиной 5 см при влажности 20 % и скорости ветра 1 м/с происходит при фронте пламени высотой до 0,75 м. Факел пламени формируется за 20 с при максимальном значении температуры в верхней части факела около 800 °С.

3. Установлена корреляция между экспериментальными значениями пространственного распределения температуры напочвенного материала вблизи цилиндрического фронта пламени и рассчитанной локальной плотностью лучистого потока энергии от модельного плоского излучателя.

4. Выявлено безопасное расстояние по докритическому нагреву хвойной подстилки, содержащей мелкие древесные фрагменты, для фронта цилиндрического пламени диаметром 10 м и высотой 0,25; 0,5 и 0,75 м, соответствующее ширине противопожарного барьера 0,2; 0,4 и 0,6 м, который способен противостоять действию тепловой радиации в течение 50 мин.

5. Установлена степень влияния влажности напочвенного слоя на скорость горения и скорость перемещения фронта пламени. При содержании воды около 20 % скорость перемещения огня при толщине слоя хвойной подстилки порядка 1 см и плотности 200 кг/м<sup>3</sup> составляет 10 м/час, что соответствует слабому низовому пожару.

6. Численный эксперимент позволил проэкстраполировать измеренные значения скорости распространения низового пожара на условия, отличающиеся по влажности напочвенной среды. Установлено, что уменьшение количества влаги в четыре раза, по сравнению с исходной (20 %), приведёт к возрастанию охваченной огнём площади в шесть раз. Возрастание влажности до 25 % уменьшит скорость распространения пожара до 2,5 м/с.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность заместителю директора Института леса НАН Беларуси по научной работе Усене В.В. и сотрудникам Научно-практического центра пожарной безопасности Гомельского областного управления Министерства по чрезвычайным ситуациям, в частности Матюхе С.Л. – начальнику центра и Дворцову В.Б. за оказанную помощь в проведении натурных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.



## Литература

1. **Природные** пожары лета 2010 года [Электронный ресурс]. 2010. Режим доступа: <http://www.lenta.ru/story/pozhary>. Дата доступа: 02.02.2010.
2. **Гоман П.Н., Людко А.А.** Сравнительный анализ деятельности по охране лесов от пожаров в Республике Беларусь и Республике Греция // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. 2009. № 2(4). С. 13–17.
3. **Городская** инспекция природных ресурсов и охраны окружающей среды // Климатическая и гидрологическая характеристика 2007 года [Электронный ресурс]. 2008. Режим доступа: <http://ekolog.na.by/files/2.htm>. Дата доступа: 02.02.2010.
4. **Национальный** статистический комитет Республики Беларусь // Годовые данные: охрана окружающей среды [Электронный ресурс]. 2010. Режим доступа: <http://belstat.gov.by/homep/ru/indicators/envir.php>. Дата доступа: 02.02.2010.
5. **Доррер Г.А., Коморовский В.С., Якимов С.П.** Оценка и прогнозирование динамики крупных лесных пожаров // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. – Вып. 2 (36). – 2011. – 16 с. – <http://ipb.mos.ru/ttb>.
6. **Гришин А.М.** Сопряженные задачи тепло- и массообмена и физико-математическая теория лесных пожаров // Инженерно-физический журнал. – 2001. – Т. 74. – № 4. – С. 48-53.
7. **Субботин А.Н.** Математическая модель распространения низового лесного пожара по подстилке или слою опада хвои // Пожарная безопасность. – 2008. – № 1. – С. 109-116.
8. **Яйлиян Р.А.** Математическая модель распространения горения по наклонной поверхности твердого топлива / Р.А. Яйлиян, А.В. Павловский, Н.В. Смирнов // Пожарная безопасность. – 2003. – № 3. – С. 79–88.
9. **Баровик Д.В., Таранчук В.Б.** Об особенностях адаптации математических моделей вершинных верховых лесных пожаров // Вестник БГУ. Сер. I, Физика. Математика. Информатика. – 2010. – № 1. – С 138-143.
10. **Баровик Д.В.** Методы и алгоритмы гео визуализации при компьютерном моделировании лесных пожаров: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18; Белор. гос. ун-т. Мн., 2010. 22 с.
11. **Гришин А.М.** Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 406 с.
12. **Гусев В.Г.** Физико-математические модели распространения пожаров и противопожарные барьеры в сосновых лесах. С.-Пб.: НИИ ЛХ, 2005. 200 с.
13. **Доррер Г.А.** Динамика лесных пожаров. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 404 с.
14. **Бурасов, Д.М.** Математическое моделирование низовых лесных и степных пожаров и их экологических последствий: дис. ... канд. ф.-м. наук: 03.00.16. Томск, 2006. 162 с.
15. **Процессы** горения / Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Исаева Л.К., Крылов Е.В. М.: Типогр. им. Воровского, 1984. 269 с.
16. **Кошмаров Ю.А., Баширицев М.П.** Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. М.: Внешторгиздат, 1987. 443 с.
17. **Система** стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004–1991. Введ. 01.07.1992. М: МВД СССР, Минхимпром СССР, 1991. 78 с.
18. **Соболь В.Р., Гоман П.Н., Януть В.И.** О влиянии формы протяженного теплового источника на плотность лучистого потока энергии // Весці БДПУ ім. М.Танка. Сер. III, № 4. 2010. С. 3-9.
19. **Касперов Г.И., Гоман П.Н.** Исследование пожароопасных свойств лесных горючих материалов сосновых насаждений // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообрабатывающая пром-ть. – 2010. – Вып. 18. – С. 337-340.
20. **Вонский С.М., Вересова И.М., Жданко В.А.** Влияние осадков на изменение влажности и горимости лесного напочвенного покрова и подстилки // Лесные пожары и технические средства борьбы с ними. – 1974. – Вып. 19. – С. 66-72.
21. **Арцыбашев Е.С.** Лесные пожары и борьба с ними. М.: "Лесная пром-ть", 1974. 152 с.